

Гистерезис тензора сопротивления в полителлуридах редкоземельных металлов

© П.Д. Григорьев^{1,2}, А.А. Синченко^{3,4}, Т.И. Могилюк⁵, П.А. Воробьев², Д. Акпаров²,
З.З. Алисултанов⁶, А.М. Дюгаев¹

¹ Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН,
Черноголовка, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

⁴ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

⁶ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия

E-mail: grigorev@itp.ac.ru

Поступила в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2022 г.

Принята к публикации 12 мая 2022 г.

Изучаются возможные причины температурного гистерезиса коэффициента Холла и диагональной компоненты сопротивления соответственно в трителлуридах и тетрателлуридах редкоземельных металлов. Ширина этого гистерезиса превышает 100 К в обоих семействах. Этот гистерезис связан с волной зарядовой плотности (ВЗП), однако его детальная природа пока еще обсуждается. Известно, что его нельзя объяснить температурным изменением волнового вектора ВЗП. В настоящей работе мы обсуждаем недостатки и преимущества различных интерпретаций наблюдаемого гистерезиса, приводим новые экспериментальные данные, показывающие сильную зависимость величины гистерезиса от интервала изменения температуры, и предлагаем новые эксперименты (или детальный анализ неопубликованных данных существующих измерений ARPES), которые могут обосновать или опровергнуть какое-то из предложенных объяснений этого необычного эффекта.

Ключевые слова: волна зарядовой плотности, гистерезис, проводимость, коэффициент Холла, анизотропия.

DOI: 10.21883/FTT.2022.09.52797.23NH

1. Введение

Трителлуриды и тетрателлуриды редкоземельных металлов, $R\text{Te}_3$ и $R\text{Te}_4$, являются сильно анизотропными слоистыми проводниками. Поверхность Ферми (ПФ) в этих соединениях, согласно зонным расчетам и данным фотоэффекта с угловым разрешением (ARPES) [1–5], состоит из двух пар гофрированных листов, перпендикулярных друг-другу и образованных p_x и p_y орбиталями теллура, дающими две зоны α электронного спектра. Эти листы имеют дополнительное бислоеное расщепление, соответствующее четной и нечетной z -зависимости волновой функции в бислоях теллура. Поверхность Ферми в виде гофрированного листа соответствует квазиодномерному закону дисперсии электронов $\epsilon_\alpha(k)$, хорошо описываемому в приближении сильной связи [1,2,3]. Эта скрытая квазиодномерная анизотропия и сильные электронные корреляции приводят к образованию волны зарядовой плотности (ВЗП) [6] с достаточно высокой температурой перехода T_{c1} , для большинства редкоземельных элементов R T_{c1} выше комнатной температуры.

Этот ВЗП переход и зависимость от импульса соответствующей щели в электронном спектре хорошо видны в ARPES [1,4,5,3] и во многих других измерениях [7–12]. Любопытно, что ВЗП переход также сопровождается нарушением изотропии проводимости вдоль слоев [12], поскольку система выбирает один ВЗП вектор из двух возможных, направленный вдоль оси y . В $R\text{Te}_3$ соединениях с более тяжелыми редкоземельными элементами $R = \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}$ при более низкой $T \leq T_{c2} \leq T_{c1}$ возникает вторая ВЗП с волновым вектором $Q_2 \perp Q_1$ [7], который уже направлен вдоль оси x . При совсем низких температурах $T \lesssim 10$ К в $R\text{Te}_3$ имеется также серия магнитных переходов [13]. Под давлением в $R\text{Te}_3$ ВЗП исчезает и возникает сверхпроводимость [14], аналогично многим органическим металлам и высокотемпературным сверхпроводникам.

В области перехода во вторую ВЗП, $T \sim T_{c2}$, в трителлуридах редкоземельных металлов $R\text{Te}_3$ наблюдается сильный температурный гистерезис коэффициента Холла [15]. Ширина этого гистерезиса превышает 100 К. В тетрателлуридах редкоземельных металлов $R\text{Te}_4$ на-

блюдается еще более сильный температурный гистерезис уже диагональной компоненты сопротивления [3] с шириной около 200 К, которая вероятно является рекордной. Гистерезис часто возникает при изменении волнового вектора ВЗП, поскольку ВЗП зацепляется за дефекты кристаллической решетки [6]. Однако никакого заметного (превышающего погрешность измерения) изменения волнового вектора ВЗП ни в трителлуридах, ни в тетрателлуридах не наблюдается, и тем более не был обнаружен его гистерезис [3,9,15–17], поэтому сценарий возникновения гистерезиса, связанный с изменением волнового вектора ВЗП, был исключен из возможных объяснений во всех полителлуридах редкоземельных металлов [3,15].

2. Экспериментальные наблюдения и зависимость величины гистерезиса от интервала изменения температуры

Просуммируем кратко экспериментальные наблюдения необычного гистерезиса электронных транспортных свойств в полителлуридах редкоземельных металлов.

В трителлуридах гистерезис наблюдается главным образом в коэффициенте Холла (см. рис. 1 в статье [15] и рис. 1 в этой работе), в то время как в диагональной компоненте тензора сопротивления в рамках экспериментальной погрешности его не заметно (см. рис. 4, *b* и 4, *c* в Supplementary Information [16] к статье [15]). Как уже отмечалось, никакого температурного изменения волнового вектора ВЗП в трителлуридах, и тем более его гистерезиса, не было обнаружено в

специально проведенных для этого экспериментах по рассеянию рентгеновских лучей [15,16,17,3], что исключает соответствующий сценарий гистерезиса. Гистерезис холловского сопротивления наблюдался ниже температуры перехода во вторую ВЗП и только в тех $R\text{Te}_3$ соединениях, где присутствует ВЗП₂, в частности, в ErTe_3 и HoTe_3 . Ширина гистерезиса составляет порядка 100 К. На рис. 1 представлены новые экспериментальные данные, показывающие кроме самого гистерезиса коэффициента Холла в ErTe_3 также сильную зависимость его величины от интервала изменения температуры. Если не опускаться слишком низко по температуре T , ограничившись только областью $130 \text{ К} < T < 175 \text{ К}$, то величина гистерезиса, то есть разница коэффициента Холла при нагревании и охлаждении, уменьшится на порядок или даже еще сильнее.

В тетрателлуридах похожий гистерезис наблюдается в диагональной компоненте тензора сопротивления (см. рис. 2, *a* в статье [3]). Ширина гистерезиса превышает 200 К и по-видимому является рекордной в материалах с ВЗП. Следует отметить, что согласно рис. 3 статьи [3], по измерениям ARPES кроме гистерезиса сопротивления также наблюдается гистерезис энергетической щели при импульсе $(k_x, k_y) \approx (\pm 0.57\pi/a, 0)$ (см. рис. 3, *a* статьи [3]), а по рентгеноструктурным измерениям наблюдается аналогичный гистерезис интенсивности рассеяния рентгеновских лучей на волновой вектор ВЗП $Q_{CDW} \approx (0.2\pi/3b)$ (см. рис. 3, *b* статьи [3]). При одной и той же температуре при нагревании эти измеренные энергетическая щель и интенсивность рассеяния рентгеновских лучей выше, чем при охлаждении. Это соответствует тому, что ВЗП сильнее при низкой температуре и конкурирует с какой-то другой неустойчивостью, которая присутствует даже при более высокой температуре. К сожалению, в статье [3] не приведены данные о гистерезисе щели в точке $(0 \pm 0.57\pi/b)$ импульсного пространства, симметричной относительно замены $x \rightarrow y$.

3. Интерпретации эффекта

Несмотря на кажущуюся общность эффекта, в трителлуридах и тетрателлуридах редкоземельных металлов этому гистерезису транспортных свойств были предложены разные физические объяснения [15,3].

Для объяснения гистерезиса коэффициента Холла в трителлуридах редкоземельных металлов была предложена конкуренция двух принципиально разных типов электронного упорядочения [15]: (i) второй ВЗП с волновым вектором $Q_2 \perp Q_1$, покрывающей заметную часть поверхности Ферми щелью $\Delta_2(k)$; и (ii) отталкивания вырожденных уровней с образованием локальной (в импульсном пространстве вблизи точек пересечения поверхности Ферми от разных зон) и большой по величине $V_0 > \Delta_2$ щели на уровне Ферми. Величина расщепления вырожденных уровней $V_0 > \Delta_1 > \Delta_2$, поскольку в

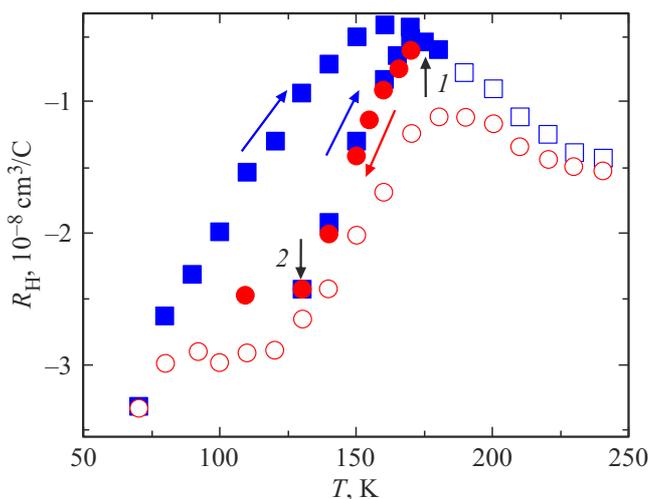


Рис. 1. Температурное изменение коэффициента Холла в ErTe_3 при нагревании от низкой T до точки 1, соответствующей 175 К (синие квадраты), после охлаждения до точки 2 при $T = 130 \text{ К}$ (красные кружки) и после прогрева до точки 1 (синие квадраты). Открытые синие квадраты и открытые красные круги дают полный цикл гистерезиса.

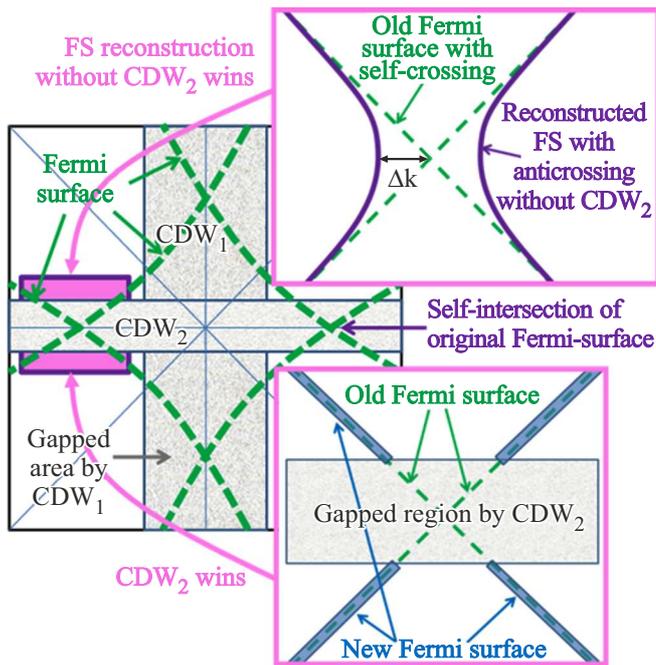


Рис. 2. Схематическое изображение поверхности Ферми в трителлуридах редкоземельных металлов и разных сценариев ее перестройки из-за второй ВЗП (CDW_2) и из-за отталкивания зон в области их пересечения на уровне Ферми.

отличие от ВЗП, соответствует взаимодействию на нулевом волновом векторе и суммируется с гибридизацией вырожденных уровней из-за перекрытия их волновых функций. Система выбирает один из этих двух типов электронного упорядочения, каждый из которых дает свой выигрыш в энергии. Оценки этого выигрыша в энергии, приведенные в статье [15], показывают что они одного порядка, но выигрыш от ВЗП₂ немного больше, поскольку в соответствующей перестройке спектра участвует большее количество электронных состояний. Тем не менее, отталкивание вырожденных уровней происходит даже при высокой температуре, в то время как ВЗП₂ возникает только при $T < T_{c2} \approx 100-200$ К. Поэтому при понижении температуры ВЗП₂ возникает на фоне расщепления V_0 . Расчет электронной восприимчивости на волновом векторе Q_2 показал [15], что отталкивание уровней в точках пересечения поверхности Ферми действительно мешает образованию ВЗП₂, поскольку уменьшает линдхардовскую восприимчивость на волновом векторе Q_2 (см. рис. 3 в статье [15]). Аналогично, ВЗП₂ уменьшает выигрыш в энергии из-за отталкивания уровней в точках пересечения поверхности Ферми, поскольку ВЗП₂ сама создает энергетическую щель в этих областях импульсного пространства. Таким образом, в зависимости от температуры и направления ее изменения (охлаждения или нагревания) реализуется один из двух этих типов электронного упорядочения, что схематически изображено на рис. 2.

Для объяснения гистерезиса сопротивления в тетрателлуридах редкоземельных металлов была предложена [3] другая модель. Для этого вводится взаимодействие ВЗП на разных слоях теллура. В тетрателлуридах имеются три разных слоя с номерами $i = 0, 1, 2$. ВЗП модулирует электронную плотность ρ_i на каждом слое с амплитудой u_i : $\tilde{\rho}_i = u_i \cos(Qr + \phi_i)$.

ВЗП на разных слоях связана кулоновским взаимодействием и через фононы. Это взаимодействие достаточно сильное, так что в статье [3] разумно предполагается, что относительный сдвиг фазы ВЗП внутри каждого бислоя $\phi_1 - \phi_2$ фиксирован на масштабе энергий существенно больше рассматриваемых. Далее в [3] рассматривается разница фаз ВЗП $\phi \equiv \phi_1 - \phi_0$ между бислоем и монослоем теллура в тетрателлуридах редкоземельных металлов. Обычное кулоновское взаимодействие или взаимодействие через поляризацию среды (фононы) дает билинейные члены взаимодействия $u_0 u_1^* + c.c. \propto \cos \phi$, но следующие порядки теории возмущений могут также давать биквадратные члены $(u_0 u_1^* + c.c.)^2 \propto \cos^2 \phi$. Поэтому в [3] вводится разложение свободной энергии по $\cos \phi$:

$$F(\phi) = F_0 + a \cos \phi + b \cos^2 \phi. \quad (1)$$

При $|a/b| < 2$ имеется два минимума свободной энергии, и в статье [3] предлагается, что наблюдаемый гистерезис связан с фазовым переходом первого рода между этими двумя минимумами свободной энергии.

На наш взгляд, этот второй сценарий гистерезиса маловероятен. Во-первых, он требует [3], чтобы коэффициенты разложения свободной энергии удовлетворяли $a \sim b$, а желательно даже $a < b$, что означает случайное почти полное сокращение вкладов кулоновского и фононного взаимодействия ВЗП в главном порядке. Это случайное сокращение в очень широком интервале температур маловероятно. Во-вторых, такая интерпретация существенно опирается [3] на предположение, что такой гистерезис наблюдается только в тетрателлуридах, где кроме бислоев есть еще монослои теллура, а в трителлуридах, где таких монослоев нет, должен отсутствовать и гистерезис. Однако, как показано в статье [15] и выше на рис. 1 это не так, и в трителлуридах наблюдается сравнимый по ширине гистерезис. Вероятность аналогичного случайного сокращения вкладов кулоновского и фононного взаимодействия ВЗП также внутри бислоя теллура с расстоянием между слоями около 3 \AA совсем мала. В-третьих, даже если предположить наличие двух минимумов в свободной энергии (1), не понятно почему это должно приводить к такому широкому (по температуре) фазовому переходу. При этом ширина гистерезиса, рассчитанная в рамках первого сценария как разница между температурой неустойчивости ВЗП₂ в присутствии и без отталкивания уровней в точках пересечения ПФ, неплохо согласуется с экспериментом [15]. В-четвертых, с учетом того, что выигрыш в энергии

ВЗП [6]:

$$\Delta E_{CDW} \approx \sum_{\alpha} \int d^3k \delta(\epsilon_{\alpha}(k) - E_F) \Delta_{CDW}^2(k, \alpha) / 2, \quad (2)$$

где k, α — это импульс и номер зоны электронов, нумерующие их квантовое состояние. Заметная разница величины щели $\sim 20\%$, определяемая направлением изменения температуры, должна приводить к существенной разнице энергии ВЗП и компенсироваться какой-то другой энергией. В первом сценарии это выигрыш в энергии из-за отталкивания уровней [15] $\Delta E_{V_0} \propto V_0^n$, не связанный с ВЗП. Здесь показатель степени $n = 3$ в отличие от привычного $n = 2$ из-за большинства неустойчивостей. Дополнительная степень V_0 возникает поскольку ширина области перестройки электронного спектра вдоль поверхности Ферми также мала по параметру V_0/E_F [15]. Во втором сценарии [3] не совсем понятно, чем компенсируется разница в энергии ВЗП в уравнении (2). Взаимодействие между ВЗП на разных слоях теллура уже заложено в величину щели ВЗП. Возможно еще перераспределение величины щели вдоль поверхности Ферми или между зонами α , т.е. изменение зависимости $\Delta_{CDW}^2(k, \alpha)$, и такое перераспределение в принципе можно обнаружить детально анализируя данные ARPES. В-пятых, сильная зависимость величины гистерезиса от интервала изменения температуры, изображенная на рис. 1, хорошо согласуется с первым сценарием. Действительно, если не опуститься достаточно низко по температуре, когда уже установится вторая ВЗП, то отталкивание уровней в области их пересечения (антикроссинг) не нарушится, и гистерезис будет очень слабым. Во втором сценарии, широкий фазовый переход первого рода, казалось бы, должен приводить к широкому гистерезису даже если не опускаться достаточно низко по температуре.

4. Обсуждение возможных дальнейших экспериментальных подтверждений и выводы

Взаимодействие или конкуренция различных типов электронной неустойчивости является достаточно общим явлением в сильно-коррелированных электронных системах, включая высокотемпературные сверхпроводники, и безусловно представляют большой научный интерес. В полителлуридах редкоземельных металлов это взаимодействие приводит к новому интересному эффекту — сильному температурному гистерезису электронно-транспортных свойств, ширина которого превышает 100 К. До сих пор однозначно признанного объяснения этому эффекту нет. Отличительной особенностью электронной структуры полителлуридов редкоземельных металлов является пересечение электронных уровней, происходящих из разных зон, на уровне Ферми при одном и том же значении квазиимпульса. Мы

предлагаем, что наблюдаемый гистерезис в три- и тетрателлуридах имеет одинаковую природу. Некоторые различия, например, то что в трителлуридах гистерезис наблюдается главным образом в коэффициенте Холла, а в тетрателлуридах в диагональной компоненте сопротивления, можно легко объяснить тем, что в трителлуридах ВЗП покрывает энергетической щелью не всю поверхность Ферми, в то время как в тетрателлуридах щель ВЗП полностью закрывает поверхность Ферми. Поэтому в тетрателлуридах изменение величины щели ВЗП, особенно вблизи ее минимума, экспоненциально сильно влияет на диагональную компоненту электрического сопротивления. В трителлуридах сохраняется металлическая проводимость и можно наблюдать эффект Холла, однако изменение величины щели ВЗП не сильно влияет на проводимость, поскольку вклад в диагональную проводимость от состояний под щелью ВЗП шунтируется вкладом от металлических (бесщелевых) электронных состояний.

Согласно предлагаемой нами модели [15] этот гистерезис возникает из-за конкуренции выигрышей энергии от ВЗП и из-за отталкивания уровней, связанного с пересечением электронных зон. Альтернативным сценарием, предложенным в работе [3], является очень широкий фазовый переход первого рода между двумя пространственными конфигурациями ВЗП, отличающимися относительным сдвигом фазы ВЗП на разных слоях теллура, например, на бислоях и на монослоях.

Детальные данные измерений ARPES могут подтвердить или опровергнуть какой-то из предложенных сценариев гистерезиса тезора сопротивления. Для этого была бы очень полезна информация о величине щели в спектре электронов на уровне Ферми в симметричных относительно замены $x \rightarrow y$ точках пересечения зон на поверхности Ферми при нагревании и при охлаждении. Если реализуется предлагаемый нами сценарий, то, во-первых, в этих точках импульсного пространства при охлаждении величина этой щели будет заметно больше, чем средняя щель ВЗП, поскольку ее природа связана не с ВЗП, а с отталкиванием вырожденных уровней. Во-вторых, разница величины этой щели в точках пересечения зон при охлаждении и нагревании будет противоположна разнице щелей в других областях импульсного пространства, поскольку она не образована ВЗП, а наоборот конкурирует с ВЗП.

Дальнейшее изучение магнитосопротивления в полителлуридах редкоземельных металлов также может помочь подтвердить или опровергнуть какой-то сценарий гистерезиса тезора сопротивления. Например, наблюдение линейного магнитосопротивления [18,19] в трителлуридах редкоземельных металлов указывает на так называемые „горячие точки“ на поверхности Ферми, в которых усилено электронное рассеяние из-за ВЗП неустойчивости или из-за пересечения зон. Если удастся наблюдать магнитные квантовые осцилляции в температурном интервале гистерезиса, что в принципе возможно поскольку в трителлуридах редкоземельных

металлов мала эффективная масса электронов, то это бы пролило свет на перестройку поверхности Ферми, вызванную образованием второй ВЗП.

Отдельно стоит отметить возможность косвенного экспериментального подтверждения пространственного фазового разделения, часто сопутствующего фазовым переходам первого рода, по температурной зависимости анизотропии сопротивления. Теория проводимости в гетерогенных материалах [20], примененная к сильно анизотропным материалам [21–26], указывает на специфическую зависимость анизотропии сопротивления, которая может дать информацию о приблизительных форме и размере островков одной фазы в матрице другой, например, металлической или любой хорошо проводящей фазы в материале с ВЗП.

Финансирование работы

Т.И. Могилуок благодарит за финансовую поддержку РФФИ (грант № 21-52- 12027). П.Д. Григорьев благодарит грант РФФИ 21-52-12043. З.З. Алисултанов благодарит грант Президента РФ МД-647.2020.2. А.М. Дюгаев благодарит госзадание 0033-2019-0001 „Развитие теории конденсированного состояния вещества“. А.А. Синченко благодарит госзадание ИРЭ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Brouet, W.L. Yang, X.J. Zhou, Z. Hussain, R.G. Moore, R. He, D.H. Lu, Z.X. Shen, J. Laverock, S.B. Dugdale, N. Ru, I.R. Fisher. *Phys. Rev. B* **77**, 235104 (2008).
- [2] D. Wu, Q.M. Liu, S.L. Chen, G.Y. Zhong, J. Su, L.Y. Shi, L. Tong, G. Xu, P. Gao, N. L. Wang. *Phys. Rev. Mater.* **3**, 024002 (2019).
- [3] B.Q. Lv, Alfred Zong, D. Wu, A.V. Rozhkov, B.V. Fine, Su-Di Chen, Makoto Hashimoto, Dong-Hui Lu, M. Li, Y.-B. Huang, J.P.C. Ruff, D.A. Walko, Z.H. Chen, Inhui Hwang, Yifan Su, Xiaozhe Shen, Xirui Wang, Fei Han, Hoi Chun Po, Yao Wang, Pablo Jarillo-Herrero, Xijie Wang, Hua Zhou, Cheng-Jun Sun, Haidan Wen, Zhi-Xun Shen, N.L. Wang. *Nuh Gedik. Phys. Rev. Lett.* **128**, 036401 (2022).
- [4] R.G. Moore, V. Brouet, R. He, D.H. Lu, N. Ru, J.-H. Chu, I.R. Fisher, Z.-X. Shen. *Phys. Rev. B* **81**, 073102 (2010).
- [5] F. Schmitt, P.S. Kirchmann, U. Bovensiepen, R.G. Moore, J.-H. Chu, D.H. Lu, L. Rettig, M. Wolf, I.R. Fisher, Z.-X. Shen. *New J. Physics* **13**, 063022 (2011).
- [6] G. Grüner. *Density waves in Solids*. 1st ed. Perseus Publishing (2000).
- [7] N. Ru, C.L. Condrón, G.Y. Margulis, K.Y. Shin, J. Laverock, S.B. Dugdale, M.F. Toney, I.R. Fisher. *Phys. Rev. B* **77**, 035114 (2008).
- [8] A. Fang, N. Ru, I.R. Fisher, A. Kapitulnik. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 046401 (2007).
- [9] M. Lavagnini, M. Baldini, A. Sacchetti, D. Di Castro, B. Delley, R. Monnier, J.-H. Chu, N. Ru, I.R. Fisher, P. Postorino, L. Degiorgi. *Phys. Rev. B* **81**, 081101(R) (2010).
- [10] A. Banerjee, Yejun Feng, D.M. Silevitch, Jiyang Wang, J.C. Lang, H.-H. Kuo, I. R. Fisher, T. F. Rosenbaum. *Phys. Rev. B* **87**, 155131 (2013).
- [11] B.F. Hu, B. Cheng, R.H. Yuan, T. Dong, N.L. Wang. *Phys. Rev. B* **90**, 085105 (2014).
- [12] A.A. Sinchenko, P.D. Grigoriev, P. Lejay, P. Monceau. *Phys. Rev. Lett.* **112**, 036601 (2014).
- [13] N. Ru, J.-H. Chu, I.R. Fisher. *Phys. Rev. B* **78**, 012410 (2008).
- [14] D.A. Zocco, J.J. Hamlin, K. Grube, J.-H. Chu, H.-H. Kuo, I.R. Fisher, M.B. Maple. *Phys. Rev. B* **91**, 205114 (2015).
- [15] P.D. Grigoriev, A.A. Sinchenko, P.A. Vorobyev, A. Hadj-Azzem, P. Lejay, A. Bosak, P. Monceau. *Phys. Rev. B* **100**, 081109(R) (2019). [DOI: 10.1103/PhysRevB.100.081109].
- [16] P.D. Grigoriev, A.A. Sinchenko, P.A. Vorobyev, A. Hadj-Azzem, P. Lejay, A. Bosak, P. Monceau. *Supplementary Materials Ref. [15]* <http://link.aps.org/supplemental/10.1103/PhysRevB.100.081109> [see also arXiv:1906.11125].
- [17] A. Girard, T. Nguyen-Thanh, S.M. Souliou, M. Stekiel, W. Morgenroth, L. Paolasini, A. Minelli, D. Gambetti, B. Winkler, A. Bosak. *J. Synchrotron Rad.* **26**, 272 (2019).
- [18] A.A. Sinchenko, P.D. Grigoriev, P. Lejay, P. Monceau. *Phys. Rev. B* **96**, 245129 (2017).
- [19] A.V. Frolov, A.P. Orlov, P.D. Grigoriev, V.N. Zverev, A.A. Sinchenko, P. Monceau. *JETP Lett.* **107**, 324 (2018).
- [20] S. Torquato. *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties*. Springer-Verlag, N.Y.(2002).
- [21] A.A. Sinchenko, P.D. Grigoriev, A.P. Orlov, A.V. Frolov, A. Shakin, D.A. Chareev, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev. *Phys. Rev. B* **95**, 165120 (2017).
- [22] P.D. Grigoriev, A.A. Sinchenko, K.K. Kesharpu, A. Shakin, T.I. Mogilyuk, A.P. Orlov, A.V. Frolov, D.S. Lyubshin, D.A. Chareev, O.S. Volkova, A.N. Vasiliev. *JETP Lett.* **105**, 786 (2017).
- [23] S.S. Seidov, K.K. Kesharpu, P.I. Karpov, P.D. Grigoriev. *Phys. Rev. B* **98**, 014515 (2018).
- [24] Т.И. Могилуок, П.Д. Григорьев, К.К. Кешарпу, И.А. Колесников, А.А. Синченко, А.В. Фролов, А.П. Орлов. *ФТТ* **61**, 9, 1599 (2019). [Т.И. Могилуок, P.D. Grigoriev, K.K. Kesharpu, I.A. Kolesnikov, A.A. Sinchenko, A.V. Frolov, A.P. Orlov. *Phys. Solid State* **61**, 1549 (2019)].
- [25] K.K. Kesharpu, V.D. Kochev, P.D. Grigoriev. *Crystals* **11**, 72 (2021).
- [26] V.D. Kochev, K.K. Kesharpu, P.D. Grigoriev. *Phys. Rev. B* **103**, 014519 (2021).

Редактор Т.Н. Василевская